بهينه سازی پارامترهای مؤثر بر جوشکاری ورق های فولادی کم کربن و کم سيليسيم مورد استفاده در ساخت وان گالوانيزه گرم *

حسن غياثی[۱]   مسعود مصلايی‌پور يزدی[۲]   علی اصغر نجف‌زاده[۳]   محمد فرخ[٤]   اميرحسين کوکبی[۵]   محمد قربانی[٦]

چکيده

وان گالوانيزه يكي از اجزاي اصلي فرآيند گالوانيزه گرم بوده و جوشكاري مرحله نهايي در ساخت آن است. در ايـن تحقيـق، اثـر پارامترهـاي مختلف جوشكاري همچون طرح پخ و تركيب شيميايي الكترود بر خواص مكانيكي، ريزساختار و مقاومت به خـوردگي مواضـع جوشـكاري شده مورد بررسي قرار گرفت. نتايج بدست آمده نشاندهنده مؤثرتر بودن طرح پخ X متقارن نسبت به طرح پخ X نامتقارن بود؛ هر چند هر دو طرح پخ خواص مكانيكي مورد نياز براي قطعات جوشكاري شده را فراهم نمودند. نتايج بررسي‌هاي غير مخرب دليل بر عاري بـودن مواضـع جوش از عيوبي همچون حفره، آخال، نفوذ ناقص و غيره بود. انجام آزمايش‌های مختلف با استفاده از سه نوع الكترود نـشان داد كـه الكتـرود Nilsil از الكترودهاي آما ۱۵۳۱ و ۲۰۰۰ در ايجاد اتصالي مطلوب مؤثرتر است. افزون بر اين، انجام آزمـايش‌هـاي خـوردگي نـشان داد كـه عنصر سيليسيم نامطلوبترين عنصر در مقاومت به خوردگي اتصالات جوشكاري شده است.

واژه‌های کليدی جوشكاري، وان گالوانيزه گرم، طرح پخ، خوردگي، الكترود كم سيليسيم.

Optimization of Effective Parameters in Welding of Low Carbon & Low Silicon Steel Plates in Hot-Dip Galvanizing Kettle

H. Ghiasi   M. Mosallaiee pour   A. Nagafzadeh   M.Farrokh   A.H.Kokabi   M.Ghorbani

Abstract

Galvanizing kettle is one of the main components of hot dip galvanizing process. Welding is the final stage in galvanizing kettle fabrication. In the persent research the effect of various welding parameters such as bevel pattern and chemical composition of filler metal on mechanical properties, microstructure and corrosion resistance of welded galvanized steel were investigated. Results showed that symmetry bevel pattern is more effective than the non-symmetry one in developing desired properties in welding zone. Although both patterns developed acceptable mechanical properties in welded coupons. NDT results confirmed that welding zone is free from defects such as porosity, inclusion trapping, lack of penetration and etc. Various tests on the electrode type showed Nilsil electrode is more effective than AMA 1531 and 2000 electrodes in producing sound joints. Corrosion tests showed that silicon is the most detrimental element on corrosion resistance of welded coupons.

Key Words Welding, Hot-Dip Galvanizing kettle, Bevel Pattern, Corrosion, Low Silicon Electrode.

---

* نسخه نخست مقاله در تاريخ ۸۷/٤/۱۵ و نسخه پايانی آن در تاريخ ۸۸/٤/۲۷ به دفتر نشريه رسيده است.

(۱) عضو هيأت علمی پژوهشکده توسعه تکنولوژی
(۲) دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شريف
(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقيقات
(٤) عضو هيأت علمی پژوهشکده توسعه تکنولوژی
(۵) استاد دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شريف
(٦) استاد دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شريف

مقدمه

وان گالوانیزه یکی از مهمترین اجزای فرآیند گالوانیزه گرم می‌باشد. با توجه به وجود روی مذاب درون وان، به وجود آمدن هر گونه عیب و یا نقص قابل ملاحظه در وان می‌تواند منجر به بروز فاجعه انسانی و مالی فراوانی شود. مهمترین عوامل مؤثر بر طول عمر وان، نوع فولاد بکار رفته در ساخت بدنه وان، کیفیت طراحی و کیفیت جوشکاری مناطق مختلف آن می‌باشد[۱]. از جمله علل اصلی از کار افتادگی وان می‌توان به تشکیل نقاط داغ و تشدید خوردگی بدنه وان در این نقاط اشاره نمود. دمای کاری بالا به همراه تنش‌های اعمالی به وان منجر به تشدید خوردگی، کاهش ضخامت دیواره و در نهایت باعث از کار افتادگی وان می‌شود[2]. دمای کاری وان‌های گالوانیزه صنعتی در حدود ۴۵۰ °C می‌باشد. توزیع غیر یکنواخت دما در بدنه وان می‌تواند منجر به تشکیل نقاط داغ موضعی در پیکره وان و در نتیجه تشدید خوردگی در بخش‌هایی ازآن شود[3-5].

در گالوانیزه گرم، مذاب روی با فولاد زمینه واکنش داده و بسته به پارامترهای مختلف، لایه‌هایی از آلیاژ آهن- روی تشکیل می‌دهد. شکل (۱) نمونه‌ای از ریزساختار این لایه‌ها را نشان می‌دهد که عبارتند از:

لایه گاما (Γ) که لایه‌ای نازک با حدود ۲۵ درصد وزنی آهن و ساختار کریستالی BCC بوده و اولین لایه مجاور به فولاد پایه است.

لایه دلتا (δ) با حدود ۱۰ درصد وزنی آهن و ساختار کریستالی هگزاگونال، اولین لایه مجاور به لایه Γ است.

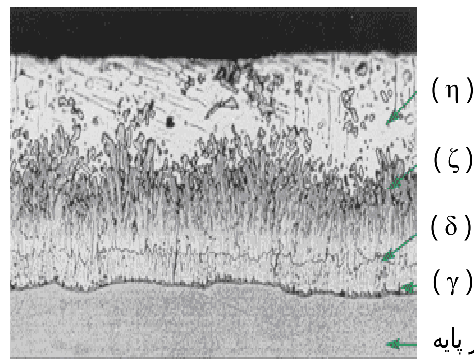
لایه زتا (ξ) با حدود ٦ درصد وزنی آهن و ساختار کریستالی منو کلینیک که مجاور به لایه دلتاست و در بالای ٤۹۰ °C پایداری خود را از دست می‌دهد.

لایه اتا (η) که تقریباً روی خالص با ساختار HCP بوده و خارجی‌ترین لایه آلیاژی است.

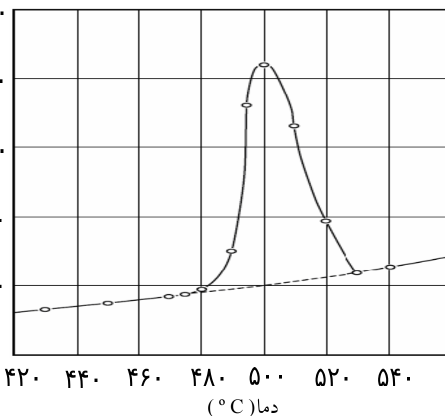
در فولادی با سختی ۱۵۹ DPN (Diamond Pyramid Number)، سختی لایه گاما ، ۲۵۰ DPN، لایه دلتا ، ۲٤٤DPN، لایه زتا ، ۱۷۹DPN و لایه اتا ، ۷۰DPN است. به عبارتی سه لایه اول سخت‌تر از فولاد بوده و لایه آخر دارای انعطاف‌پذیری بالاست. ترکیب سختی، انعطاف‌پذیری و چسبندگی بالای این پوشش‌ها از آنها محافظی با خواص بسیار خوب می‌سازد. عوامل مختلفی بر تشکیل هر یک از لایه‌های آلیاژی فوق و ضخامت و ظاهر آنها مؤثر است که عبارتند از: ترکیب شیمیایی فولاد پایه، شرایط سطحی فولاد، انجام کار سرد بر روی فولاد قبل از گالوانیزه، دمای حمام مذاب روی، زمان تماس مذاب با فولاد و سرعت بیرون کشیدن و سردشدن فولاد (درهنگام گالوانیزه قطعات فولادی)[6].

از مهمترین عوامل مؤثر بر خوردگی وان گالوانیزه می‌توان به دمای فصل مشترک دیواره وان با مذاب داخل وان و ترکیب شیمیایی مذاب اشاره نمود. در شکل (۲) تأثیر دمای فصل مشترک دیواره و مذاب روی داخل وان بر سرعت خوردگی دیواره وان ارائه شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود سرعت واکنش یاد شده در محدوده دمای ٤۹۰–۵۲۰ °C به شدت افزایش می‌یابد[2].

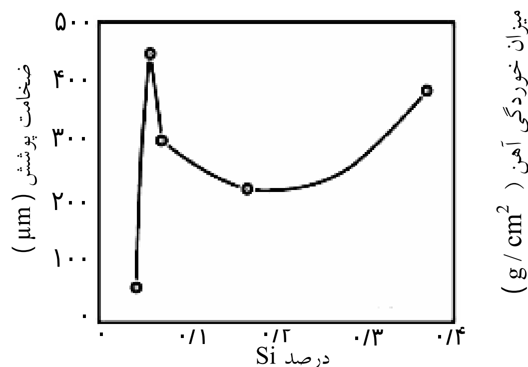
حضور برخی عناصر آلیاژی مانند سیلیسیم، فسفر و غیره باعث توسعه محدوده تشدید خوردگی به ٤۸۰–۵۳۰ °C می‌شود[2,7]. میزان سیلیسیم و فسفر در فولاد شدیداً بر ضخامت و ظاهر پوشش گالوانیزه مؤثر است. این عناصر می‌توانند سبب ایجاد پوشش‌هایی ضخیم و ترد شوند. اثر مقدار سیلیسیم فولاد بر ضخامت پوشش و لایه آلیاژی تشکیل شده در شکل (۳) نشان داده شده است. عناصر کربن، گوگرد و منگنز تأثیر ناچیزی بر ضخامت پوشش گالوانیزه دارند. لکن مقادیر کربن کمتر از ۰/۲۵ درصد، فسفر کمتر از ۰/۰٤ درصد و یا منگنز کمتر از ۱/۳۵ درصد مفید است. فسفر در طی فرآیند گالوانیزه به عنوان یک کاتالیزور عمل نموده و باعث رشد سریع لایه‌های آلیاژی آهن- روی می‌شود.



شکل ۱ لایه‌های آلیاژی تشکیل شده در یک پوشش گالوانیزه گرم[6]



شکل ۲ تأثیر دما بر سرعت واکنش آهن با روی مذاب[2]



شکل ۳ تغییرات ضخامت لایهٔ آلیاژی تشکیل شده بـر دیـوارهٔ داخلی وان برحسب میزان سیلیسیم[۱۰].

براساس شکل (۳) حـضور سیلیـسیم بـه میـزان ۰/۱۱–۰/۰۵ درصـد وزنـی باعـث رشـد لایـه آلیـاژی تـشکیل شـده بـر دیـواره وان و افـزایش ضـخامت آن می‌شود. این محـدوده از درصـد سیلیـسیم را محـدوده سندلین (Sandeline Range) می‌گویند [8,11].

بـا توجـه بـه شـکل و بـدون در نظـر گـرفتن مورفولوژی لایه های آلیاژی تشکیل شـده، بـه منظـور افزایش عمرکاری وان مطلوبترین حالـت آن اسـت کـه مقدار عنصر سیلیسیم در ترکیب شیمیایی فولاد به کـار رفته در ساخت وان و همچنین مواضع جوشکاری شده آن کمتر از ۰/۰۵ درصد وزنـی نگهداشـته شـود. البتـه محدوده ۰/۲۵–۰/۱۵ درصدوزنی نیـز حـالتی مطلـوب نسبت به بقیه درصدهاست[۹،٤و۱۱]. از طرفی با توجه به اینکه واکنش روی با آهن یک فرآیند نفوذی اسـت، دماهای بالاتر وان مذاب روی و زمان‌های تماس بیشتر آن با فولاد، لایه‌های آلیاژی ضخیم‌تری ایجاد می‌نماید. همانند تمـام فرآینـدهای نفـوذی واکـنش در آغـاز بـه سرعت پیشرفت نموده و با رشد لایـه‌هـا و ضـخیم‌تـر شدن آنها، کند می‌شـود. از طرفـی تلاطـم مـذاب روی داخل وان هنگام فروبردن یا بیرون کـشیدن قطعـات از آن، و یا حتی گاهی بر خورد قطعات بـه دیـواره وان و نیز، دمای بالا در برخی نقاط (نقـاط داغ) باعـث کنـده

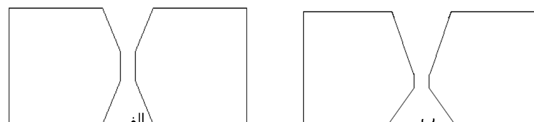
شدن یا حل شدن لایه‌های آلیاژی محافظ تشکیل شده بر سطح فولاد وان شده و آن را در معرض خوردگی و واکنش مجدد با روی مذاب قرار می‌دهد که باعث کاهش عمر وان می‌شود.

به طور کلی یک وان گالوانیزه همانقدر قابل اعتماد است که مواضع جوشکاری شدهٔ آن قابل اطمینان باشند. از این رو، لازم است ترکیب شیمیایی، ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی مناطق جوشکاری شده مشابه و یا بهتر از خواص مشابه در فولاد وان باشد. با توجه به تولید موفقیت آمیز فولادهای مورد استفاده برای ساخت وان و خم‌کاری آنها در کشور و عدم دسترسی به اطلاعات فنی مربوط به جوشکاری این ورق‌ها، در تحقیق حاضر راهکارهای مهمی برای ایجاد اتصالی قابل اطمینان و اقتصادی در این فولادها، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

روش تحقیق

به منظور بررسی پارامترهای مورد نظر در این تحقیق، هشت ورق فولادی از جنس فولاد مورد استفاده در ساخت وان گالوانیزه با ابعاد ۶۰۰×۱۵۰×۵۰mm و ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول(۱) مورد استفاده واقع شد.

به منظور تعیین تأثیر پخ بر خواص و کیفیت مواضع جوشکاری شده، شش ورق از فولاد مزبور توسط طرح پخ X متقارن و دو ورق توسط طرح پخ X نامتقارن آماده‌سازی شد (شکل٤).



شکل٤ شماتیک طرح پخ
الف) طرح پخ X متقارن (ب) طرح پخ X نامتقارن.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده

عنصر آلیاژي	Fe	C	Si	Mn	P	S
درصدوزني	پایه	۰/۰۶-۰/۰۸	۰/۰۱-۰/۰۲	۰/۲۵-۰/۳۱	۰/۰۰۴-۰/۰۰۶	۰/۰۱۳-۰/۰۱۹

جدول ۲ مشخصات الکترودهای مورد استفاده و نمونه‌های جوشکاری شده با آنها

نوع الکترود	شرکت تولید کننده	ترکیب شیمیایي (درصد وزني)							
		C	Si	Mn	P	S	کدنمونه	طرح پخ	کد الکترود
آما۲۰۰۰	آما	۰/۰۸	۰/۴	۰/۶	--	--	A	X متقارن	O
آما۱۵۳۱	آما	۰/۰۸	۰/۲	۰/۵	<۰/۰۲	<۰/۰۲	B	X متقارن	B
Nilsil	Metrode	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۸	۰/۰۳	۰/۰۳	C	X نامتقارن	N
							D	X متقارن	

ورق‌های آماده سازی شده دو به دو توسط فرآیند جوشکاری قوس با الکتروددستی، جریان DC با پلاریته مثبت، ولتاژ OCV حداقل ۷۰V و ولتاژ جوشکاری ۲۷V-۲٤ به یکدیگر جوش داده شدند. جوشکاری به صورت عمودی سربالا (3G) و حرکت زیگزاگی صورت پذیرفت. افزون بر این، برای جلوگیری از ایجاد پیچیدگی، جوشکاری متناوباً در طرفین ورق ها انجام شد. برای بررسی تأثیر ترکیب شیمیایی الکترودها بر خواص مواضع جوشکاری شده از سه‌نوع الکترود با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) استفاده گردید[13,14].

در این تحقیق فولاد پایه با حرف E نامگذاری شده است. تعیین کیفیت و خواص مکانیکی مواضع جوشکاری شده توسط آزمایش‌های غیر مخرب و مخرب و مطابق با استانداردهای ASME Sec IX و DIN EN 1043-1 صورت پذیرفت. مهمترین آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های جوشکاری شده عبارت بودند از: امواج ماوراء صوت (UT)، مایع نفوذ کننده (PT)، آنالیز شیمیایی فلز جوش، بررسی ریز ساختاری و درشت ساختاری فلز جوش و مناطق اطراف آن و آزمایش‌های کشش، سختی سنجی و خمش [1]. به علت اهمیت زیاد مسئله خوردگی در مواضع جوشکاری شده، آزمایش خوردگی بر روی قطعات جوشکاری شده توسط الکترودهای مختلف نیز صورت پذیرفت. آزمایش خوردگی در مذاب روی با دمای 445 ± 10 ºC و در مدت زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ شبانه روز در وان مذاب صنعتی انجام شد. برای بررسی میزان خوردگی درهر یک از نمونه ها، ابعاد ووزن نمونه‌ها قبل از ورود به وان مذاب وبعد از خروج از آن اندازه گیری شد. افزون بر این، ضخامت پوشش روی ایجاد شده بر روی نمونه ها بعد از خروج از وان به روش متالوگرافی وتعیین اختلاف وزن نمونه اولیه با نمونه پس از خروج از وان، اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

سلامت جوش و عدم حضور عیوبی از قبیل تخلخل، ناخالصی، نفوذ ناقص دیواره و غیره در مناطق جوشکاری شده با الکترودها و طرح پخ‌های متفاوت توسط آزمایشات غیر مخرب امواج ماوراء صوت و مایع نافذ تأیید شد. نتایج حاصل از آزمایش کشش نمونه‌های جوشکاری شده و فولاد پایه در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳ نتایج حاصل از آزمایش کشش بر روی فولاد پایه و نمونه‌های جوشکاری شده

کد نمونه	استحکام تسلیم MPa	استحکام کششي MPa	موضع شکست
A	۲۴۸	۳۷۴	فلزپایه
B	۲۱۲	۳۴۹	فلزپایه
C	۲۰۱	۳۴۲	فلزپایه
D	۲۱۵	۳۵۱	فلزپایه
E	۱۷۰	۳۰۴	---

از نتایج جدول فوق با توجه به موضع شکست نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودها و طرح پخ‌های مختلف و در نظر گرفتن خواص کششی فولاد پایه نتیجه می‌گیریم که نمونه‌های جوشکاری شده دارای خواص مکانیکی مطلوبی می‌باشند. خواص کششی کمی بالاتر نمونه جوشکاری شده با طرح پخ X متقارن(نمونهD) نسبت به طرح پخ X نامتقارن (نمونه C) می تواند به دلیل حذف و یا کاهش تنش‌های پسماند در حین جوشکاری طرفین طرح پخ متقارن باشد. در این شرایط احتمال پیچیدگی ناشی از جوشکاری نیز کاهش می‌یابد. یکی دیگر از دلایل ترجیح پخ X متقارن نسبت به نامتقارن جنبه اقتصادی آن است. چنانکه در هر یک از طرح‌های پخ فوق الذکر جهت کاهش هزینه ها فقط می‌توان طرف در تماس با مذاب را با الکترود کم سیلیسیم جوش داده وطرف دیگر را با الکترود معمولی جوشکاری نمود. از این جهت در طرح پخ نامتقارن درصورتی که طرف با فاصله جوش کمتر با الکترود کم سیلیسیم جوشکاری شود، به دلیل عمق جوش کمتر آن نسبت به طرح متقارن، دارای عمر کمتری در تماس با مذاب خواهد

بود؛ چرا که مدت زمان لازم تا رسیدن به ریشه جوش (با فرض خورده شدن کامل یک طرف پخ) کمتر است. در صورتی که طرف با فاصله جوش بیشتر با این الکترود جوش داده شود، هزینه آن نسبت به طرح متقارن افزایش می‌یابد. زیرا الکترود مخصوص بیشتری مصرف می‌شود. لذا طرح متقارن از این جهت نیز نسبت به طرح نامتقارن برتری دارد.

نتایج حاصل از آزمایش خمش جانبی (Side Bend) نمونه‌های مختلف نشان داد که نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودها و طرح پخ‌های مختلف از انعطاف‌پذیری قابل قبولی نیز برخوردارند. نتایج آزمایش کشش و خمش جانبی براساس معیارهای مشخص شده در استانداردASME Sec IX [14]، در محدوده مجاز و قابل قبول واقع است.

در جدول (٤) ترکیب شیمیایی فلزجوش حاصل از الکترودهای مختلف اندازه گیری شده توسط روش اسپکترومتری، ارائه شده است.

جدول ٤ ترکیب شیمیایی فلز جوش حاصل از الکترودها

نوع الکترود	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)				
	C	Si	Mn	P	S
آما ۲۰۰۰	۰/۰۷	۰/۳۸	۰/٥٦	۰/۰۱۷	۰/۰۱۲
آما ۱۵۳۱	۰/۰۷	۰/۲	۰/٥۸	۰/۰۲۲	۰/۰۱۳
Nilsil	۰/۰۹	۰/۰٦	۰/٤۳	۰/۰۱۷	۰/۰۰۷

مقایسه ترکیب شیمیایی فلز جوش حاصل از الکترودهای مختلف (جدول ٤) و فلزپایه (جدول ۱) نشان می‌دهد که الکترود Nilsil مطلوبترین الکترود برای ایجاد فلز جوشی نزدیک به ترکیب شیمیایی فلز پایه به ویژه در مقدار سیلیسیم که عنصری حساس در خوردگی است، می‌باشد. با توجه به میزان مشارکت فلزپایه در ترکیب شیمیایی فلزجوش، درجه رقت الکترود Nilsil حدود ۳۵ درصد و الکترودهای آما ۲۰۰۰ و آما ۱۵۳۱، به ترتیب، مقادیر ٤۰ و ۳۸/٥ درصد محاسبه گردید. درصد عنصر سیلیسیم حاصل از جوش هر سه الکترود در ناحیه نزدیک به HAZ و پاس ریشه به علت اثر رقت فلز پایه کمتر از مقدار آن در پاس‌های بعدی جوش است.

نتایج حاصل از سختی سنجی نمونه‌های مختلف توسط روش ویکرز در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول۵ نتایج آزمایش سختی‌سنجی نمونه ها **(HV)**

کد قطعه جوشکاری شده	سختي فلز جوش	سختي منطقه HAZ
A	۱۹۴	۱۴۲
B	۱۷۹	۱۲۸
C	۱۶۳	۱۲۲
D	۱۵۷	۱۲۰

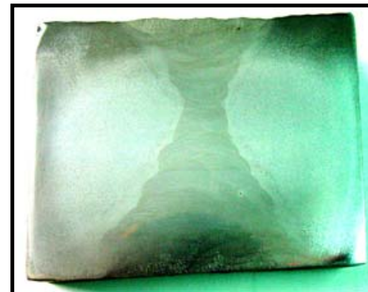
سرعت بالای سرد شدن وانجماد حوضچه جوش و ناحیه متأثر از حرارت جوش باعث ایجاد سختی بالاتر در این مناطق نسبت به سختی فلزپایه (۱۱۰HV) می‌گردد. از نتایج جداول (۳ و ۵) تأثیر سیلیسیم بر خواص مکانیکی به خوبی قابل مشاهده است. همانگونه که می‌بینیم افزایش درصد سیلیسیم باعث افزایش استحکام نهایی و تسلیم و نیز سختی فولاد می‌شود.

بررسی‌های ماکروسکوپی انجام شده بر روی نمونه‌های جوشکاری شده، نتایج آزمایش‌های غیرمخرب در مورد عدم حضور تخلخل، ناخالصی، نفوذ ناقص و یا دیگر عیوب در مواضع جوش را تأیید می‌نماید، شکل(۵).

تصاویر ریزساختاری مناطق مختلف در نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود Nilsil شامل فلز جوش، منطقه متأثر از حرارت جوش و فلز پایه در شکل (٦) ارائه شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود ریزساختار فلزجوش یک ساختار ریختگی متشکل از فاز فریت و مقدار کمی پرلیت می‌باشد. ریز ساختار در نواحی متأثر از حرارت جوش و فلز پایه نیزشامل فریت به همراه مقداری پرلیت است که اندازه دانه های فریت درآنها به ترتیب حدود۱۱

ASTM(قطر متوسط ۷/۹ میکرومتر) و ۷-۶ ASTM (قطر متوسط ۴٤/۹-۳۱/۸ میکرومتر) است. لازم به ذکر است که تغییر نوع الکترود مصرفی و طرح پخ باعث تغییر اندکی در ریزساختار موضع اتصال می‌شود که می‌تواند ناشی از شرایط جوشکاری باشد. افزون بر این، ریز ساختار در پاس‌های مختلف نیز ممکن است به صورت ریز دانه، درشت دانه یا ستونی باشد.

نتایج حاصل از آزمایش خوردگی نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودهای مختلف در شکل (۷) **ارائه شده است. در** این شکل و شکل(۸)، حروف N ، OوB به ترتیب معرف نمونه های جوشکاری شده با الکترود Nilsil، آما ۲۰۰۰ وآما ۱۵۳۱و B.M معرف فلزپایه و اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نشان دهنده مدت زمان انجام آزمون خوردگی در ۱۰، ۲۰ و ۳۰ شبانه روز است.

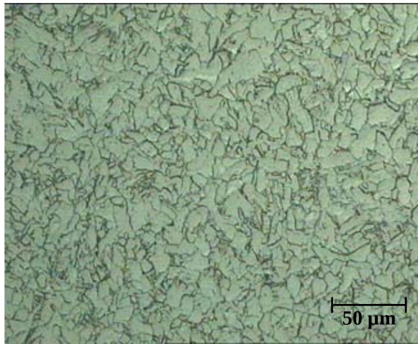


الف

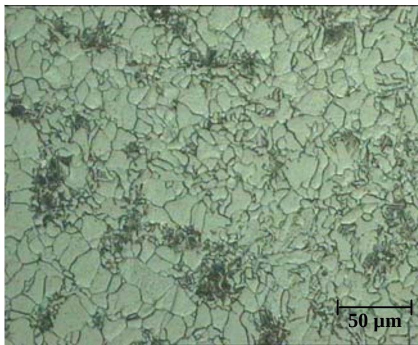


ب

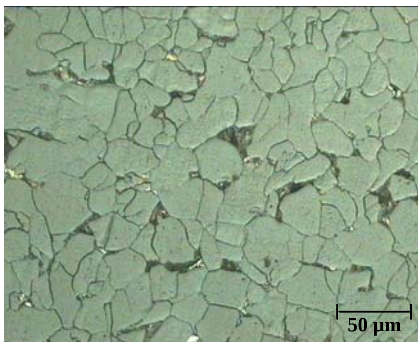
شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود Nilsil (الف) طرح پخ نامتقارن، (نمونه **C**)، (ب) طرح پخ متقارن (نمونه **D**)



الف



ب



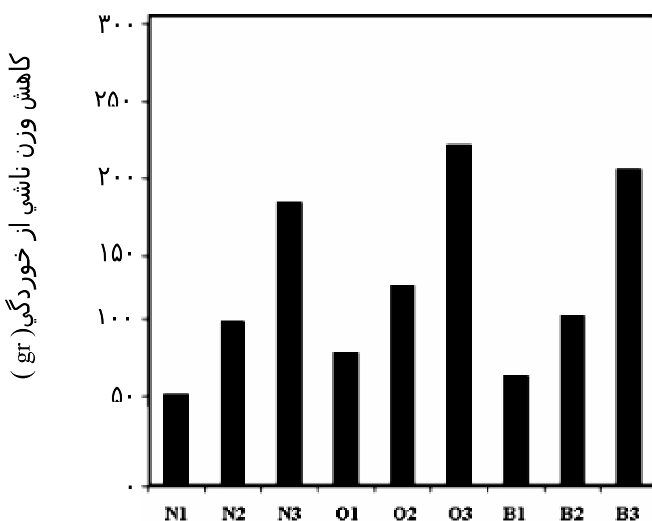
ج

شکل ٦ ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود Nilsil و طرح پخ متقارن (الف) فلزجوش (ب) منطقه HAZ (ج) فلزپایه.

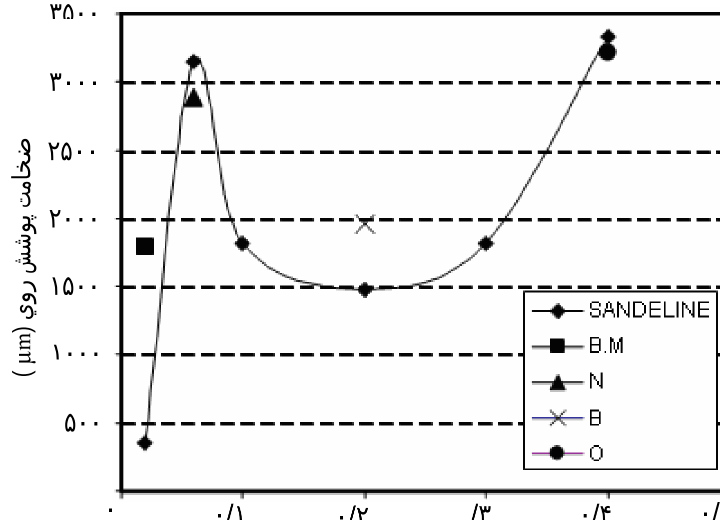
کمترین و بیشترین میزان کاهش وزن ناشی از خوردگی به ترتیب مربوط به کمترین و بیشترین میزان سیلیسیم فلزجوش نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودهای مزبور است. مقادیر بیشتر سیلیسیم در فلز جوش ایجاد شده توسط الکترود آما ۲۰۰۰ باعث

تشدید خوردگی در این نمونه می‌شود.

مقایسه تأثیر درصد سیلیسیم در فلزجوش حاصل از الکترودهای مزبور بر ضخامت پوشش روی- آهن ایجاد شده بر روی نمونه‌ها در طی آزمایش خوردگی به همراه منحنی سندلین در شکل (۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که اندازه گیری ضخامت پوشش روی- آهن در سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و بعد از خارج نمودن آنها از وان مذاب صورت پذیرفت. همانطور که در شکل (۸) دیده می‌شود ضخامت پوشش ایجاد شده بر روی فلزجوش نمونه جوشکاری شده با الکترود Nilsil در محدوده سندلین (0.05-0.11 درصد سیلیسیم) واقع شده که در این ناحیه پوشش آلیاژی از فاز ζ با مورفولوژی پیوسته و متراکم حاکم است. البته لایه نازکی از فاز δ نیز تشکیل می شود. فاز ζ مذکور همانند سدی، از خوردگی بدنه وان توسط مذاب روی جلوگیری می‌نماید. در مورد نمونه جوشکاری شده با الکترود آما ۲۰۰۰، ضخامت پوشش تشکیل شده بر روی فلزجوش کاهش یافته و مورفولوژی لایه آلیاژی یادشده از حالت متراکم خارج می‌شود. در این حالت، پایداری لایه ζ کاهش یافته ولایه ضخیمی مرکب از δ و FeSi ایجاد می‌شود. این پوشش آلیاژی نمی‌تواند از خوردگی بیشتر فلز پایه جلوگیری نماید. در نتیجه نرخ خوردگی در نمونه جوشکاری شده با الکترود آما ۲۰۰۰ حداکثر مقدار است. مقدار سیلیسیم برحسب ضخامت لایه در فلزجوش نمونه جوشکاری شده با الکترود آما ۱۵۳۱ در قسمت انتهای منحنی سندلین و در خارج از این محدوده واقع می‌شود. در این وضعیت علی‌رغم ضخامت نسبتاً بالای لایه ζ ، مورفولوژی آن مانند ζ حاصل از الکترود Nilsil دیگر پیوسته و متراکم نبوده وپایداری آن نیز کمتر است. افزون بر این، لایه های آلیاژی تشکیل شده در این حالت شامل لایه نسبتاً ضخیمی از ζ ولایه نازکی مرکب از δ وFeSi است . به عبارت دیگر الکترود آما ۱۵۳۱ در ایجاد موضع اتصالی مقاوم در برابر خوردگی، کارآیی الکترود Nilsil را ندارد. از طرفی فلز پایه با حداکثر مقدار سیلیسیم ۰/۰۲ درصد وزنی قبل از محدوده سندلین واقع شده و دارای کمترین میزان ضخامت پوشش روی می‌باشد.



شکل۷ میزان کاهش وزن نمونه‌های مختلف در آزمایش خوردگی انجام شده در دمای^{o}C ۱۰ ± ٤٤٥ در وان مذاب روی (N : نمونه جوشکاری شده با الکترود Nilsil ، O : نمونه جوشکاری شده با الکترود آما ۲۰۰۰ ، B : نمونه جوشکاری شده با الکترود آما ۱۵۳۱ ۱۰:۱شبانه روز نگهداری در وان ، ۲۰:۲ شبانه روز نگهداری در وان ، ۳۰:۳ شبانه روز نگهداری در وان)



شکل۸ منحنی سندلین به همراه تغییرات ضخامت پوشش روی با تغییر درصدسیلیسیم در نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودهای Nilsil (N)، آما۱۵۳۱(B)، آما ۲۰۰۰(O) و در فلز پایه(B.M).

از نتایج شکل‌های (۷ و ۸) استنباط می شود که علی‌رغم آنکه فلز جوش ناشی از الکترود Nilsil در محدوده سندلین واقع شده است وضخامت بالایی از پوشش روی بر سطح آن تشکیل می شود، لکن نوع مورفولوژی این پوشش باعث کاهش میزان خوردگی در آن می گردد. به عبارتی هر چه مقدار سیلیسیم کمتر باشد ، میزان خوردگی ناشی از تماس با مذاب روی، کمتر می شود.

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، با بررسی تأثیر نوع الکترود و طرح پخ بر خواص مکانیکی، خوردگی و ریزساختار مواضع جوشکاری شده نتایج ذیل حاصل گردید.

۱- استحکام کششی فلز جوش کلیه قطعات جوشکاری شده از فلز پایه بیشتر بوده و همهٔ نمونه‌ها از محل فلز پایه و خارج از محل جوش شکستند.

۲- در بررسی خواص نرمی و انعطاف‌پذیری در آزمایش خمش، همهٔ نمونه‌های آماده‌سازی شده به صورت Side bend تا زاویه ۱۸۰ درجه تحت خمش قرار گرفتند. در نتیجه این آزمایش هیچگونه ترکی مشاهده نشد و کلیه نمونه ها از انعطاف-پذیری خوبی برخوردار بودند.

۳- سختی کلیه نمونه‌ها در ناحیه جوش، بالاتر، در ناحیه فلز پایه کمتر و در ناحیه HAZ ما بین این دو می‌باشد. با مقایسه نواحی جوش سه الکترود با یکدیگر، سختی ناحیه جوش در الکترود آما ۲۰۰۰ بیشتر و در الکترود Nilsil کمتر است.

٤- ریز ساختار نواحی جوش، فلز جوش و HAZ در نمونه‌های جوشکاری شده با الکترودهای آما ۲۰۰۰، آما ۱۵۳۱ و Nilsil فریتی با کمتر از۱۰ درصد پرلیت بوده و فقط از لحاظ اندازه دانه‌های فریت متفاوت می‌باشند.

٥- در الکترود آما ۲۰۰۰ با بالاترین درصد سیلیسیم، میزان رقت، ٤۰ درصد و بیشترین است، در الکترود Nilsil با پائین‌ترین درصد سیلیسیم، میزان رقت،

۳۵ درصد و کمترین است و در الکترود آما ۱۵۳۱ به میزان ۳۸/٦ درصد است. میزان سیلیسیم در پاس‌های نهایی به آنالیز الکترود نزدیکتر است. لذا قابلیت جوش پذیری با افزایش سیلیسیم در پاس‌های نهائی الکترود آما ۲۰۰۰ کمتر می‌شود. افزون بر این، درپاس‌های نهائی، ساختارستونی شکل مشاهده می‌شود.

٦- ضخامت اندازه‌گیری شده لایه‌های آلیاژی پوشش روی برحسب مقادیر مختلف سیلیسیم نشان می-دهد که ضخامت لایه آلیاژی با تغییر مقدار سیلیسیم تغییر می‌کند. همچنین از مقایسه این نتایج با منحنی سندلین مشاهده می‌شود که ضخامت پوشش در فلز پایه کمترین بوده و قبل از محدوده سندلین قرار دارد؛ در نمونه های جوشکاری شده با الکترود Nilsil افزایش یافته و در محدوده سندلین قرار می‌گیرد، با الکترود آما ۱۵۳۱ کاهش یافته و بعد از محدوده سندلین واقع می‌شود و در الکترود آما ۲۰۰۰ مجدداً در خارج از محدوده سندلین افزایش می‌یابد.

۷- میزان کاهش وزن و کاهش ابعاد در نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود پر سیلیسیم، بیشتر است. به عبارتی در این نمونه ها خوردگی بیشتر بوده و با گذشت زمان، میزان و عمق آن بیشتر می شود. همچنین، افزایش این عنصر از ۰/۲ درصد به ۰/٤ درصد در فولاد می‌تواند اثر زیادی بر شدت خوردگی بگذارد. ضخامت پوشش روی نیز با گذشت زمان افزایش می‌یابد ولی استحکام و چسبندگی پوشش کاهش می‌یابد.

به طورکلی نتایج آزمایشها دلالت دارند بر اینکه الکترود کم سیلیسیم مقاومت قابل قبولی در مقابل حمله مذاب روی دارد. لذا فلز جوش حاصل از الکترود Nilsil با ترکیبی نزدیک به فولاد پایه دارای رفتار خوردگی مشابه با آن است. از طرفی می‌توان نتیجه گرفت که مواد مصرفی جوشکاری با میزان سیلیسیم بالا برای استفاده در ساخت یا تعمیر وان‌های گالوانیزه گرم مناسب نیست، زیرا احتمال شکست سریع بعد از مدت زمان کاری کوتاهی حتی بدون در نظر گرفتن نقاط داغ وجود دارد. البته باید توجه خاصی به کیفیت جوش‌ها هنگام ساخت و تعمیر وان‌ها صورت گیرد و علاوه بر انتخاب الکترود مصرفی با حداقل میزان سیلیسیم می‌بایست پارامترهای صحیح جوشکاری نیز رعایت شود.

۸- براساس این نتایج انتظار می‌رود ماده مصرفی آما ۱۵۳۱ با میزان سیلیسیم تا حدود ۰/۲ درصد نیز جوش‌هائی با عمر کاری رضایت بخشی ارائه دهد.

۹- مشخص گردید که مناسب‌ترین طرح پخ و الکترود (از بین سه الکترود مورد استفاده) برای جوشکاری ورق‌های وان گالوانیزه، طرح پخ X متقارن و الکترود Nilsil می‌باشد.

تقدیر و تشکر

لازم می‌دانیم از تمامی عزیزانی که در پژوهشکده توسعه تکنولوژی، شرکت آما (بالاخص آقای مهندس رحیمی) و شرکت سپنتا ما را در هر چه بهتر به انجام رسانیدن این تحقیق یاری نمودند تقدیر و تشکر نمائیم.

مراجع

۱. پژوهشکده توسعه تکنولوژي، گروه پژوهشي متالورژي، "بررسي جوش‌پذيري ورق‌هاي فولادي كم كربن- كم سيليسيم مورد استفاده در ساخت وان‌هاي گالوانيزه" خرداد(۱۳۸۵).

2. Watson K.B., and Furphy A.S., "The Design and Construction of Steel Galvanizing Kettles For Long Life", The 4th Asia Pacific Galvanizing Confernece, Kualalumpur, Malaysia, pp. 1-4, (1999).

3. Watson K.B., Cannan B.C., Bosman M., and Li H., ″Welding Consumables for Galvanizing Kettles″, Welding Research Supplement, Vol.46, pp.33-39, (2001).

4. Tunney W., Konecny R.C., Ballitt R.W., and Cigan J.M., ″Failure in Galvanizing Kettles″, Proceeding of the Conference on Fracture Analysis of Galvanizing Kettles, Pennsylvania, U.S.A, pp.40-51, (1952).

5. http://www.corbecgalv.com/ Faq.html

6. http://www.galvanizeit.org

7. Horstmann D., ″ The Influence of Impurities in Iron on Attack by Molten Zince″, The 4th International Conference on Hot Dip Galvanizing, pp.58-67, (1956).

8. Mackwiak J., and Short N.R., ″Metallurgy of Galvanizing Coatings″, International Metals Reviews, Vol.24, No.1, pp. 1-19, (1969).

9. Jintang L., Chunshan C., Gang K., Qiaoyu X., and Jinbong C., ″Influence of Silicon on the $\alpha - Fe/\Gamma$ Interface of Hot Dip Galvanizing Steels″, Scripta Materiala Vol.200, No.18-19, pp.5277-5281, (2006).

10. Watson K.B., and Cannan B.G., ″Welding Consumables for Galvanizing Kettles Assessment of Long term exposure Test Coupons″, Welding Research, Under Publication.

11. Notowidjojo B.D., Wingrove A.L., and Kennon N.F., ″Possible Source of Dross Formation in Zinc-0.1% Nickel Galvanizing Process″, Material Forum, Vol.13, pp.73-75, (1989).

12. Pelerin J., Hoffman J., and Lerroy V., ″Influence of Silicon and Phosphor on the Commercial Galvanization of Mild Steels″, Metallurgical Transactions, Vol.35A. No.9, pp. 870-873, (1981).

13. Handbook Welding Consumables and Cutting and Grinding Wheels, AMA Industrial Co.

14. http:// www. metrode. com (Data sheet DS.E-72,Nilsil).

15. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX, Welding and Brazing Qualification, (QW-250), (1978).